Revista CIENCIA **Vol. 20, 1, 85-104 (2018)**

DETERMINISTIC SEISMIC HAZARD SPECTRUM FOR TECHNICAL UNIVERSITY OF AMBATO AT HUACHI

Christian Medina R, Paul Cobos T, Santiago Medina R.

Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Universidad Técnica de Ambato.
cd.medina@uta.edu.ec; palucobos18@hotmail.com; wsmedina@uta.edu.ec

Received: January 2018. Accepted: February 2018

ABSTRACT

The present investigation carries out a deterministic seismic hazard assessment for the Technical University of Ambato at Huachi, from the reverse faults discovered, in the province of Tungurahua and in provinces surrounding. In the first instance, there were identified and selected the seismic sources (faults) capable of producing significant ground motion. It was used the information published by the NEOTEC research group, made up of the Geophysical Institute of the National Polytechnic School in conjunction with institutes and geological services of South American and European countries, dealing with the neotectonics of South America. Data were used to analyze the geophysical parameters of each fault, such as its activity, historical seismicity, instrumental seismicity, type, proximity to the study site and other criteria to select only the most potentially hazardous faults.

Subsequently, the distances from each of the sources to the study site were determined, as well as their maximum seismic potential, applying the Wells and Coppersmith methodology, which establishes empirical relationships between the magnitude of the moment and the rupture length, rupture area and rupture width of the earthquake generating fault. At the same time, it was carried out a soil profile geological, to obtain the relationship between the type of soil and the amplification of the rock - soil seismic wave.

Once the information was obtained, it proceeded to the selection and application of attenuation equations GMPE's according to the tectonic regimes of Ecuador and validated by the Global Earthquake Model, to predict the behavior of the ground in terms of the peak ground acceleration PGA. Thus, the purpose of this study is to determine a specific site spectrum, to evaluate the dynamic behavior and seismic performance of the existing structures at Campus Huachi under the probable maximum seismic event. In addition, it can be established comparisons between the specific site spectrum and the NEC 2015 design elastic spectrum, to make the best selection of seismic design parameters for new structures on.

Key words: DSHA, Specific Site Spectrum, Seismic Engineering.

ESPECTRO DE AMENAZA SÍSMICA ESPECÍFICO PARA EL CAMPUS HUACHI DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO EN FUNCIÓN DE FALLAS CIEGAS INVERSAS

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se ha llevado a cabo una evaluación de peligro sísmico de tipo determinista en el campus Huachi de la Universidad Técnica de Ambato, en función de las fallas ciegas inversas descubiertas hasta el momento, en la provincia de Tungurahua y en provincias aledañas.

En primera instancia, se identificaron y seleccionaron todas las fuentes sismogénicas (fallas) capaces de producir un movimiento del terreno significativo en el sitio de estudio, para lo cual se utilizó la información publicada por el grupo de investigación NEOTEC, conformado por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional en conjunto con institutos y servicios geológicos de países sudamericanos y europeos, que trata de la neotectónica de Sudamérica. Con esta información, se analizaron los parámetros geofísicos de cada falla como su actividad, sismicidad histórica, sismicidad instrumental, tipo, cercanía al sitio de estudio y otros criterios para seleccionar únicamente las fallas potencialmente más peligrosas.

Posteriormente se determinaron las distancias de cada una de las fuentes al sitio de estudio, así como su potencial sísmico máximo aplicando la metodología de Wells y Coppersmith, la cual establece relaciones empíricas entre la magnitud de momento y la longitud, área y ancho de ruptura de la falla generadora del sismo. Paralelamente, se realizó un estudio de prospección geológica del suelo, a fin de obtener la relación entre el tipo de suelo y el grado de amplificación de la onda sísmica roca – suelo.

Una vez obtenida la información, se procedió a la selección y aplicación de ecuaciones de atenuación GMPE's acordes con los regímenes tectónicos de Ecuador y validadas por el Global Earthquake Model, para intentar predecir el comportamiento del suelo en términos de la aceleración máxima PGA. Es así como, el objetivo principal de este estudio es el de determinar un espectro específico de sitio, que permita evaluar el comportamiento dinámico de las estructuras existentes en el campus Huachi de la UTA ante el evento sísmico máximo probable. Además, con este espectro se podrán establecer comparaciones con el espectro elástico de diseño calculado en base a la Norma Ecuatoriana de Construcción 2015, a fin de realizar la mejor selección de los parámetros de diseño sismorresistente para nuevas estructuras en el predio.

Palabras Claves: Peligro Sísmico, Espectro Específico, Ingeniería Sísmica.

1. INTRODUCCIÓN

En la sección I se presenta una introducción del estado del arte en cuanto a estudios de peligrosidad sísmica en Ecuador, específicamente en la ciudad de Ambato. Se resalta la necesidad del estudio. En la sección II se describen tanto el marco teórico como la metodología utilizada para llevar a cabo la presente investigación. En la sección III se analizan y discuten los resultados obtenidos del estudio de peligro sísmico, resaltando los aspectos más relevantes de cada fuente sísmica analizada. Finalmente, las conclusiones más relevantes son presentadas en la sección VI.

La posición del Ecuador en la costa oriental del océano Pacífico, lo hace parte de una de la región sísmica de mayor actividad en el planeta, llamado Cinturón de Fuego del Pacífico. Esta actividad se debe a que constantemente ocurren cambios continuos en la superficie del planeta, en respuesta al movimiento e interacción de las llamadas placas tectónicas (Egred & Yepes et al, 2007).

De hecho, de acuerdo con el estudio probabilista de peligrosidad sísmica del Ecuador realizado por el comité de la Norma Ecuatoriana de Construcción, se reconoce el hecho de que la principal fuente de generación de energía sísmica en el Ecuador es el fenómeno natural de subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana, y que por este efecto se genera un complejo sistema de fallas local superficial capaz de producir sismos importantes en gran parte del territorio ecuatoriano (NEC-SE-DS, 2015).

Esto se ha verificado a través de los años pues han sido las fallas superficiales la que han generado sismos de importancia en el territorio ecuatoriano, que han dejado a su paso pérdida de vidas humanas y recursos económicos. Específicamente, en Ambato el último sismo se produjo el 5 de agosto de 1949 de Mw 6.5 el cual se lo asocia a una falla superficial.

Es por esta razón que el conocimiento de la sismicidad de una localidad es necesario no solamente para el diseño de estructuras sino para todo cálculo o plan de mitigación, sobre todo cuando en la zona existen estructuras esenciales para el desarrollo de la comunidad (hospitales, centros de educación, bomberos, policía) o aquellas de concentración masiva. Adicionalmente, los códigos de construcción establecen incluida la NEC15, establecen que, para poblaciones mayores a 100.000 habitantes, disponer de estudios de microzonificación sísmica y geotécnica en su territorio, estudio con el que aún no cuenta la ciudad de Ambato.

Por lo tanto, al ser el campus Huachi de la UTA un centro de educación superior que acoge diariamente a miles de estudiantes, docentes y personal administrativo, y al no contarse con estudios de microzonificación sísmica, es necesario que se realice un estudio de peligro sísmico específico; pues a partir de él se podrá evaluar el desempeño de las estructuras existentes, a fin de tomar acciones preventivas y/o correctivas, a más de tener una mejor visión para el diseño de nuevas estructuras.

2. METODOLOGÍA

2.1 Selección de las Fuentes Sismogénicas

En primer lugar, para la evaluación del peligro sísmico se deben seleccionar todas aquellas potenciales fuentes de actividad sísmica, que pueden generar futuros sismos. Para ello, es necesario un cierto trabajo de detección, observación e identificación de rasgos naturales. Este trabajo de detección incluye la clasificación de la falla en activa o inactiva, se evalúa si esta ha generado desplazamiento superficial dentro del Holoceno, es decir aproximadamente en los últimos 10,000 años (Aguilar, 2016).

Si bien el estudio de la tectónica de nuestro país es relativamente joven, se cuentan con estudios geológicos actualizados en los cuales se han identificado, clasificado y caracterizado las fallas existentes, como en el estudio realizado por (Egüez , Alvarado, & Yepes, 2003). A partir de este estudio se han generado actualizaciones como lo realizado por (NeoTec, 2011), en el cual se ha compilado información nueva con la finalidad de presentar un mapa unificado, promover una terminología técnica estandarizada para la región andina e ilustrar casos de fallas activas de los diferentes ámbitos tectónicos y climáticos de los Andes y de este manera apoyar en el reconocimiento de estas deformaciones activas.

Otro de los criterios adoptados para la selección de fuentes, ha sido la magnitud potencial de la falla, dado que la evaluación determinista evalúa el escenario más desfavorable, por lo que se han seleccionado las fallas generadoras de sismos de mayor magnitud. A menudo, la longitud de ruptura de la falla ha sido usada para estimar la magnitud de los terremotos. Sin embargo, este método se adapta mejor a casos en que la superficie de ruptura es angosta, típicamente menor que 20 km. Al adoptar este criterio se tiene que fallas con mayor longitud de ruptura generan mayor magnitud.

Así mismo, se analizó la sismicidad histórica de la región expuesta en trabajos previos como el de (Egred & Yepes et al, 2007), al igual que el catálogo sísmico homogenizado actualizado al 2017 publicado por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador (IG-EPN, 2017). Con esta información se asociaron sobre todo sismos superficiales a una falla en específico.

De esta manera, las fallas seleccionadas para el estudio se han seleccionado 4 fallas de las cuales 3 corresponden al régimen de fallas corticales y la falla restante corresponde a la principal fuente generadora de sismos en Ecuador, la zona de subducción. En la figura 1 se muestran las fallas seleccionadas y en la tabla 1 se anotan sus características principales.

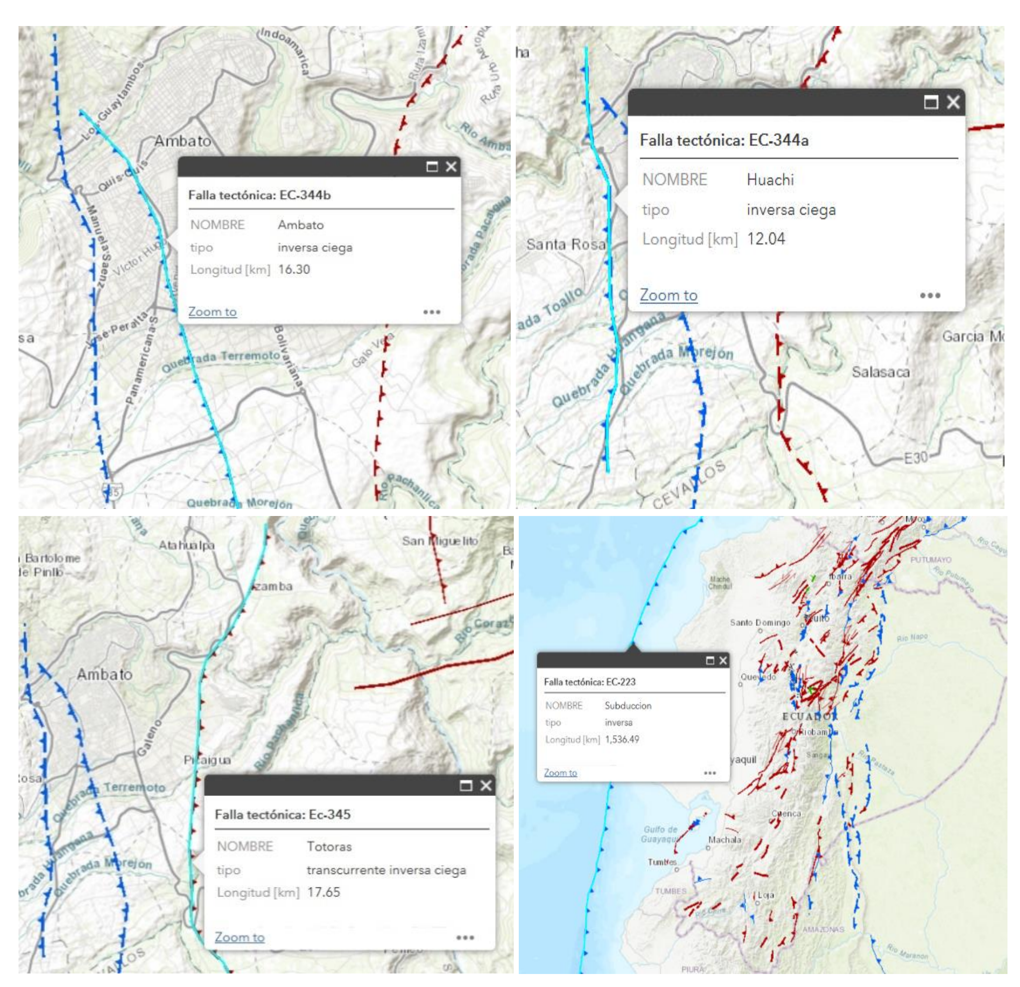


Figura 1 Fuentes Sísmicas seleccionadas
Fuente: Catálogo Homogenizado 1587-2017 IG-EPN

Tabla 1 Propiedades de las Fuentes Seleccionadas

FUENTE	DESIGNACIÓN	TIPO	LONGITUD
Ambato	EC-344b	Inversa Ciega	16.30km
Huachi	EC-344a	Inversa Ciega	12.04km
Totoras	EC-345	Transcurrente Inversa Ciega	17.65km
Subducción	EC-223	Inversa	1536.49km

2.2 Determinación de la Distancia Fuente – Sitio

Uno de los parámetros determinantes en la estimación de la aceleración máxima del suelo en el sitio de análisis, es la distancia que existe entre él y la fuente sismogénica. De esta forma, mientras más cerca se encuentre una falla del sitio de estudio, los valores de aceleración incrementarán con tendencia logarítmica. Adicionalmente, si una estructura se encuentra dentro de lo que se denomina campo cercano, es decir a una distancia menor o igual a 10km de una falla, el estudio de peligro sísmico es imperativo, puesto que la componente vertical del sismo es de proporciones considerables.

La determinación de la distancia, generalmente se la estima en función de la ecuación de atenuación que se pretende utilizar. Dado que la geometría de una falla es de tipo espacial, es decir tiene ancho, longitud, profundidad y ángulo de buzamiento, las distancias que se tomen a la misma pueden se variables en función del punto de referencia que se tome en la falla. Es así como, las distancias que generalmente se utilizan en la estimación del peligro sísmico son las siguientes:

Rjb: Distancia de (Joyner & Boore, 1981) la cual es la distancia perpendicular a la proyección vertical en la superficie de la falla.

Rhypo: Distancia al hipocentro.

Rrup: Distancia al punto más cercano de ruptura de la falla.

En la figura 2 se muestra una gráfica de las distancias fuente – sitio.

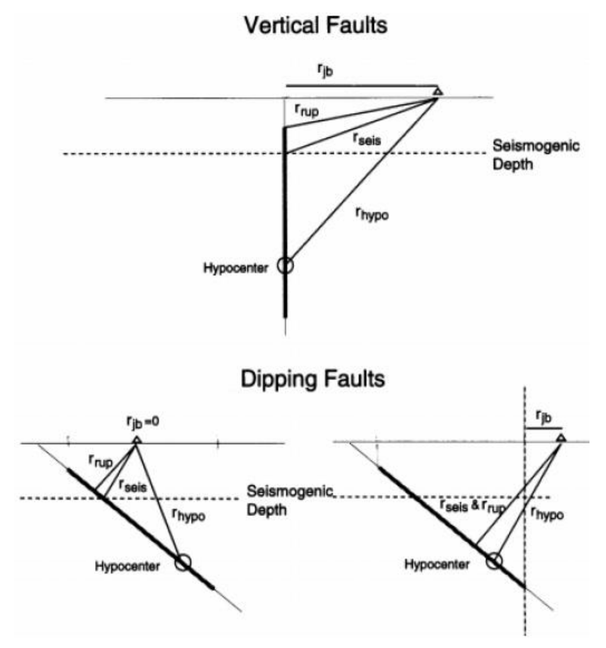


Figura 2 Distancias Fuente – Sitio
Fuente. - (Kramer, 1996)

La distancia fuente – sitio que se ha utilizado para el presente estudio es la dada por (Joyner & Boore, 1981) por su simplicidad y debido a que es la que requieren la mayoría de ecuaciones de atenuación para la estimación del peligro. Por lo que las distancias a cada una de las fallas se indican en la tabla 2.

Tabla 2 Distancia fuente – sitio

FUENTE	**DESIGNACIÓN**	**Rjb**
Ambato	EC-344b	0.50km
Huachi	EC-344a	1.8km
Totoras	EC-345	3.6km
Subducción	EC-223	291.5km

2.3 Determinación de la Magnitud de Momento

La evaluación del peligro sísmico determinista DSHA consiste en la evaluación de un escenario sísmico en específico que generalmente se remite al evento máximo que se pueda generar. Por esta razón, es que se evalúa el potencial máximo que cada falla seleccionada puede generar, expresado por la magnitud de momento. Para ello, se ha aplicado la metodología de (Wells & Coppersmith, 1994) en la cual a partir del estudio de movimientos fuertes y su magnitud alrededor del mundo, se establecen relaciones empíricas entre la magnitud de momento, longitud de ruptura, ancho de ruptura, área de ruptura y desplazamiento en la superficie de una falla.

De las relaciones establecidas en el estudio, se ha utilizado como parámetro la longitud de ruptura en la superficie de la falla. En la figura 3 se muestran las relaciones empíricas establecidas por (Wells & Coppersmith, 1994), para la longitud de ruptura.

Table 2A
Regressions of Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Moment Magnitude (**M**)

Equation*	Slip Type†	Number of Events	Coefficients and Standard Errors		Standard Deviation	Correlation Coefficient	Magnitude Range	Length/Width Range (km)
			a(sa)	b(sb)	s	r		
$\mathbf{M} = a + b * \log(SRL)$	SS	43	5.16(0.13)	1.12(0.08)	0.28	0.91	5.6 to 8.1	1.3 to 432
	R	19	5.00(0.22)	1.22(0.16)	0.28	0.88	5.4 to 7.4	3.3 to 85
	N	15	4.86(0.34)	1.32(0.26)	0.34	0.81	5.2 to 7.3	2.5 to 41
	All	77	5.08(0.10)	1.16(0.07)	0.28	0.89	5.2 to 8.1	1.3 to 432
$\log(SRL) = a + b * \mathbf{M}$	SS	43	−3.55(0.37)	0.74(0.05)	0.23	0.91	5.6 to 8.1	1.3 to 432
	R	19	−2.86(0.55)	0.63(0.08)	0.20	0.88	5.4 to 7.4	3.3 to 85
	N	15	−2.01(0.65)	0.50(0.10)	0.21	0.81	5.2 to 7.3	2.5 to 41
	All	77	−3.22(0.27)	0.69(0.04)	0.22	0.89	5.2 to 8.1	1.3 to 432

*SRL—surface rupture length (km); RLD—subsurface rupture length (km); RW—downdip rupture width (km), RA—rupture area (km^2).
†SS—strike slip; R—reverse; N—normal.

Figura 3 Distancias Fuente – Sitio
Fuente. - (Wells & Coppersmith, 1994)

En la tabla 3 se indican las magnitudes de momento máximas, estimadas para cada falla.

Tabla 3 Magnitud de Momento

FUENTE	DESIGNACIÓN	LONGITUD	Magnitud de Momento Mw
Ambato	EC-344b	16.30km	6.5
Huachi	EC-344a	12.04km	6.3
Totoras	EC-345	17.65km	6.5
Subducción	EC-223	1536.49km	8.9

2.4 Efectos de Sitio

El grado de amplificación de la aceleración del sismo desde la roca hacia el suelo de cimentación, esta en función de la velocidad de onda de corte del mismo evaluada dentro de los primeros 30m. Una de las formas más eficientes de evaluar Vs30, se consigue aplicando la metodología propuesta por (Nakamura, 1989) mediante ruido ambiental, la cual destaca la relación espectral H/V, interpretándose como un pico predominante en la elipticidad de las ondas Rayleigh alrededor de la frecuencia fundamental del suelo siempre que exista un contraste de impedancia considerable (de 2,5 a 3 veces) entre el material en superficie y el basamento rocoso.

Por otro lado, es posible estimar con cierto grado de incertidumbre la velocidad de onda de corte, a partir del número de golpes obtenido de un ensayo de penetración estándar SPT. Si bien esta metodología es más simplificada, se ha observado que tiene un grado de aproximación aceptable al método de (Nakamura, 1989). De hecho, en el estudio realizado por (Pérez-Santisteban & Muñoz, 2012) se establece la correlación entre Vs y NSPT mediante la técnica ReMi en el área urbana de Madrid, a partir de un análisis estadístico entre 500 valores de NSPT y Vs a profundidades ensayadas en los sondeos. De esta forma se obtuvieron las siguientes relaciones empíricas

$$Arena \quad Vs = 98.69 * N_{SPT}^{0.321} \tag{1}$$

$$Arcillas \quad Vs = 159.43 * N_{SPT}^{0.344} \tag{2}$$

$$Todos\ los\ suelos \quad Vs = 62.6 * N_{SPT}^{0.52} \tag{3}$$

Es así que luego de haber realizado el estudio de suelos, se determinó que en el campus Huachi de la Universidad Técnica de Ambato existe un suelo tipo D clasificado de acuerdo a (NEC-SE-DS, 2015), clasificado como SM (arena – limosa) de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, por lo que se ha aplicado la ecuación 1 para estimar la velocidad de onda de corte. Se han realizado

cuatro exploraciones dentro de los predios del campus universitario cuya ubicación se muestra en la figura 4, de las cuales se ha obtenido un promedio del Vs. Los resultados se muestran en la tabla 4.

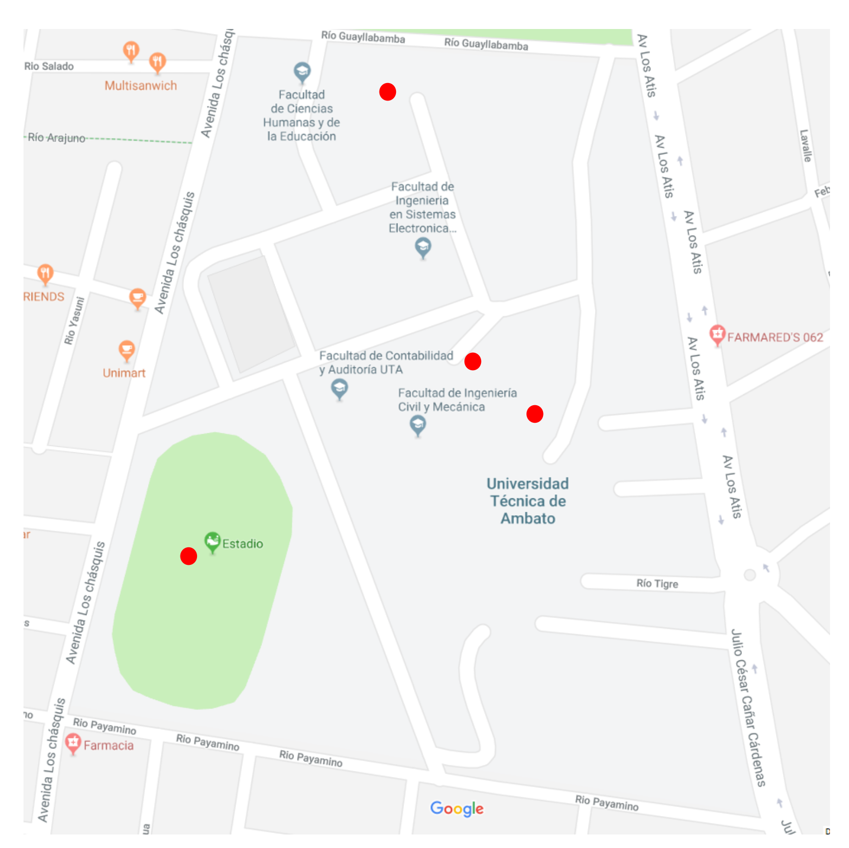


Figura 4 Ubicación Perforaciones
Fuente. – Elaboración propia

Tabla 4 Estimación de la Velocidad de Onda de Corte

Sitio	NSPT	Tipo de Perfil	Vs (m/s)	Vs m/s promedio
Laboratorio FICM	37	D	314.53	294.87
FICM	30	D	294.06	
Parqueadero FICM	31	D	297.17	
Pista UTA	24	D	273.73	

2.5 Selección de Ecuaciones de Atenuación

Una ecuación de atenuación GMPE por sus siglas en inglés, intenta predecir el comportamiento del suelo en términos ingenieriles en función de la aceleración, velocidad o desplazamiento, y el grado de atenuación de estas en función de la distancia. El proceso de selección de una GMPE es un paso muy sensible que debe cumplir con ciertas condiciones que verifiquen su aplicabilidad en un sitio determinado, sobre todo si la ecuación no fue desarrollada con registros sísmicos de la región en estudio.

En Ecuador, el estudio de la sismología de movimientos fuertes es relativamente joven, por lo que no se cuentan con registros suficientes como para poder una ecuación específica para su régimen tectónico. Sin embargo, los estudios realizados por (Cotton & et al, 2006), nos brindan directrices para seleccionar ecuaciones que se ajusten a un lugar diferente para el que fue determinada la ecuación. En primera instancia, la ecuación seleccionada debe ser correspondiente al régimen tectónico en estudio, es decir que los registros con los que se desarrolló la ecuación sean compatibles con el tipo de fallamiento que se esté estudiando. Por otro lado, la forma funcional de la ecuación debe ser congruente con la tendencia de atenuación de la onda en función de la distancia. Generalmente esta tendencia es de tipo logarítmica. Además, la base de datos debe ser lo suficientemente completa y contener registros de movimientos de magnitud considerable, que permita establecer comparaciones en el grado de atenuación entre un movimiento y otro y así determinar una tendencia. Finalmente, es recomendable que la ecuación esté validada por un comité de expertos en el tema, que generalmente es el (Global Earthquake Model, 2009).

Es así como, las ecuaciones seleccionadas para el presente estudio se describen a continuación:

Régimen Cortical

- **Modelo de (Boore & Atkinson, 2008)**

$$Ln\, y = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, M) + \varepsilon \quad (4)$$

$$FD(RJB, M) = [c1 + c2(M - Mref)]\ln(R/Rref) + c3(R - Rref) \quad (5)$$

$$Si\ M \leq Mh \quad (6)$$

$$FM(M) = e1U + e2SS + e3NS + e4RS + e5(m - Mh) + e6(M - Mh)^2$$

$$Si\ M > Mh \quad (7)$$

$$FM(M) = e1U + e2SS + e3NS + e4RS + e7(M - Mh)$$

$$Fs = FLIN + FNL \quad (8)$$

- **Modelo de (Akkar & Bommer, 2010)**

$$\text{Log y} = b1 + b2M + b3M^2 + (b4 + b5M)\log\sqrt{R^2jb + b^26} + b7SS + b8SA + b9FN + b10FR + \mathcal{E}\sigma \quad (9)$$

Categorías tipo de suelo:

Suelo blando: SS= 1; SA= 1; Vs30 < 360m/s.

Suelo rígido: SS= 1; SA= 1;

Roca: SS= 0; SA= 0; Vs30 > 750m/s.

Categorías mecanismo de falla:

Falla normal: FN= 1; FR= 1

Falla inversa: FN= 1; FR= 1

Falla transcurrente: FN= 0; FR= 0

- **Modelo de (Kanno & et al, 2006)**

Si D ≤ 30 Km:

$$\text{Log pre} = a1Mw + b1X - \log(X + d1 * 10^{e1Mw}) + c1 + \mathcal{E}1 \quad (10)$$

Si D > 30 Km:

$$\text{Log pre} = a2Mw + b2X - \log(X) + c2 + \mathcal{E}2 \quad (11)$$

Régimen Subducción Interfase

- **Modelo de (Youngs & et al, 1997)**

$$\text{Ln y} = -0.6687 + 1.438M + C1 + C2(10 - M)^3 + C3 * Ln\,(R + 1.097e^{0.617*M}) + 0.00648H + 0.3643Zt \quad (12)$$

- **Modelo de (Zhao & et al, 2006)**

$$log\ y = aMw + bx - log(r) + e(h - hc)\delta + FR + SI + Ss + SSL\ log(x) + Ck \quad (13)$$

Cabe anotar que para el presente estudio se ha trabajado con valores medios, es decir sin tomar en cuenta la desviación estándar que considera la incertidumbre en la estimación de las aceleraciones.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Espectros determinados para la Falla Ambato

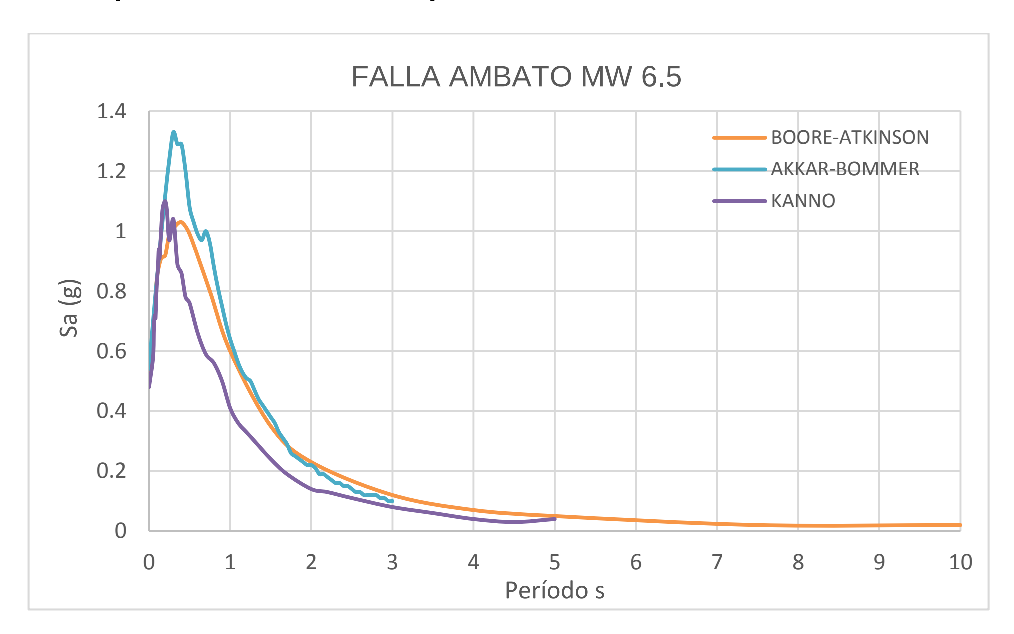


Figura 5 Espectros Falla Ambato
Fuente. – Elaboración Propia

Se puede apreciar que el grado de ajuste de dos de las tres ecuaciones seleccionadas para régimen cortical es bastante bueno, puesto que la tendencia de atenuación de la aceleración es bastante similar y la variación de la misma entre las es relativamente baja.

Sin embargo, se observa además que para períodos cortos (0.10s-0.50s), la ecuación provista por (Akkar & Bommer, 2010) es la predomínate y los valores de aceleración son significativamente mayores a los dados por las otras dos ecuaciones. Este efecto se debido a que dicha ecuación es más conservadora en cuanto a la amplificación por de efectos de sitio, toda vez que la misma no utiliza la velocidad de onda de corte del suelo, sino que solamente clasifica al suelo como

rígido o blando.

Por otro lado, las ecuaciones provistas por (Boore & Atkinson, 2008) y (Kanno & et al, 2006) utilizan en su forma funcional la velocidad de onda de corte a los 30m, por lo que se ajustan de mejor manera a cada tipo de suelo, por lo que los resultados de ambas ecuaciones son bastante similares.

3.2 Espectros determinados para la Falla Huachi

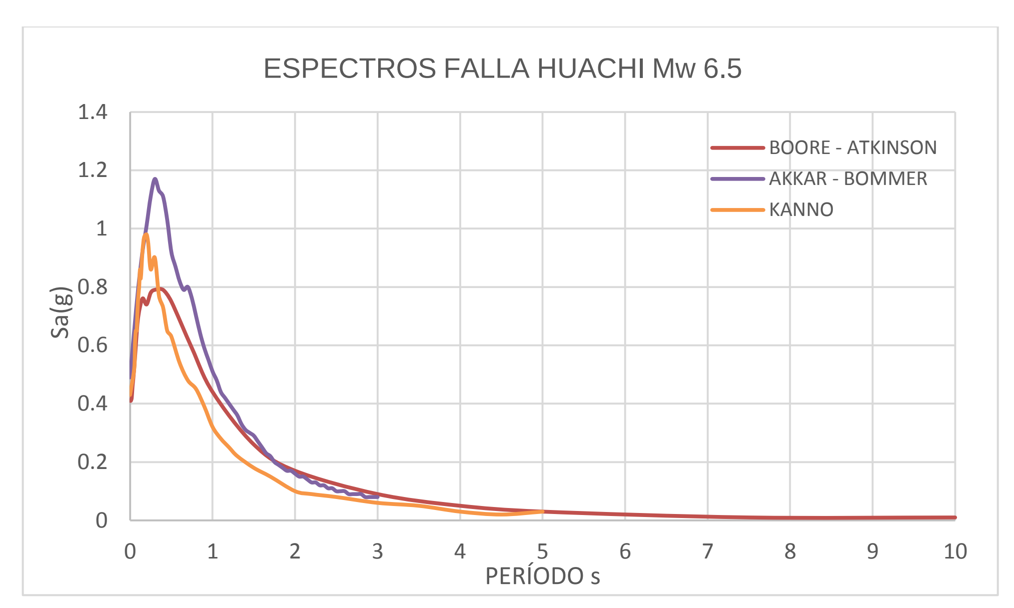


Figura 6 Espectros Falla Huachi
Fuente. – Elaboración Propia

Al igual que en el caso anterior, se observa una predominancia de la ecuación de (Akkar & Bommer, 2010). Sin embargo, en este caso se observa que las aceleraciones dadas por esta ecuación caen más rápidamente en relación con las otras por lo que para períodos estructurales de estructuras de mediana altura (T>1.6s) se observa que la ecuación que genera aceleraciones mayores es el modelo de (Boore & Atkinson, 2008).

3.3 Espectros determinados para la Falla Totoras

En este caso en particular, en la figura 7 se observa que el grado de ajuste entre las ecuaciones de (Akkar & Bommer, 2010) y (Kanno & et al, 2006) es mucho mejor en comparación con (Boore & Atkinson, 2008), por lo que se puede apreciar que al utilizar la tercera ecuación, la aceleración máxima tiende a decaer más rápidamente

conforme aumenta la distancia, mientras que con las dos primeras ecuaciones el decaimiento es gradual. Esta afirmación se justifica además, observando que para la falla Ambato, la cual es la falla más cercana al sitio, el mejor ajuste se obtiene entre (Kanno & et al, 2006) y (Boore & Atkinson, 2008), pero para fallas más lejanas los resultados de la última ecuación se alejan rápidamente.

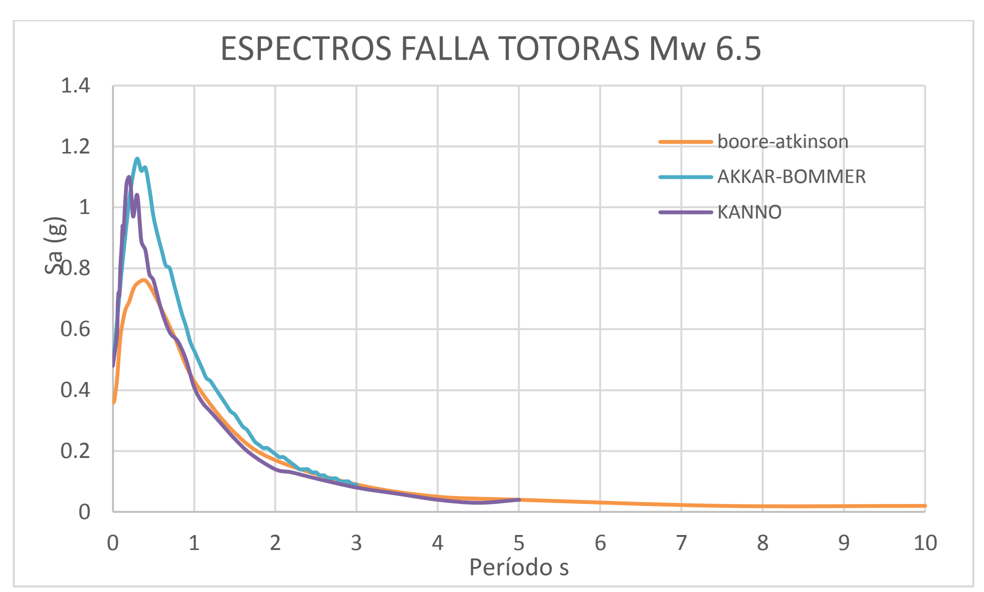


Figura 7 Espectros Falla Totoras
Fuente. – Elaboración Propia

3.4 Espectros determinados para la Zona de Subducción

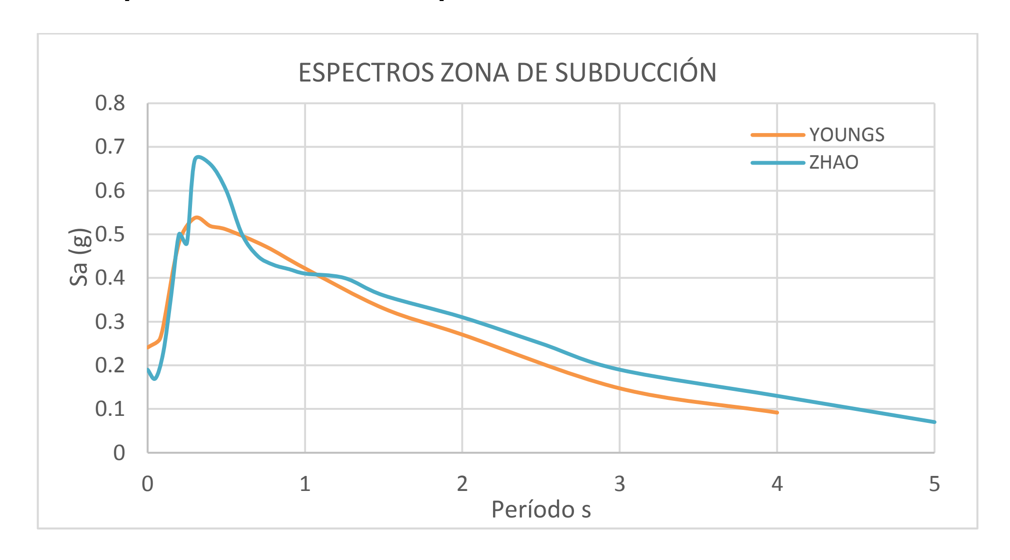


Figura 8 Espectros Falla Subducción
Fuente. – Elaboración Propia

Se observa que el ajuste obtenido entre las dos ecuaciones es correcto puesto que la variación de datos de aceleraciones es relativamente baja. Se puede apreciar además que la pendiente de caída de la aceleración en función del período estructural es mucho menor en comparación con las ecuaciones para régimen cortical, lo cual muestra que para fallas más lejanas el rango de períodos estructurales crítico es más amplio.

Sin embargo, para períodos estructurales cortos en este caso en particular las aceleraciones para régimen subducción son menores en comparación con las aceleraciones generadas por las fallas del régimen cortical.

3.5 Espectro Específico para Campus Huachi UTA

En la figura 8 se observan todos los espectros generados para todas las fallas seleccionadas utilizando las ecuaciones descritas. Se puede apreciar que para períodos comprendidos entre 0.1s y 1.5s se espera que la falla Ambato sea la que genere las aceleraciones de mayor magnitud. Esto se justifica dado que esta es la falla más cercana al sitio de estudio, a solo 500m de la proyección superficial de la falla. Sin embargo, para períodos estructurales mayores a 1.5s se espera que los efectos más peligrosos sean causados por la falla de subducción, por lo que se concluye que las fallas más lejanas afectan a estructuras más altas mientras que las fallas más cercanas afectan más a estructuras bajas.

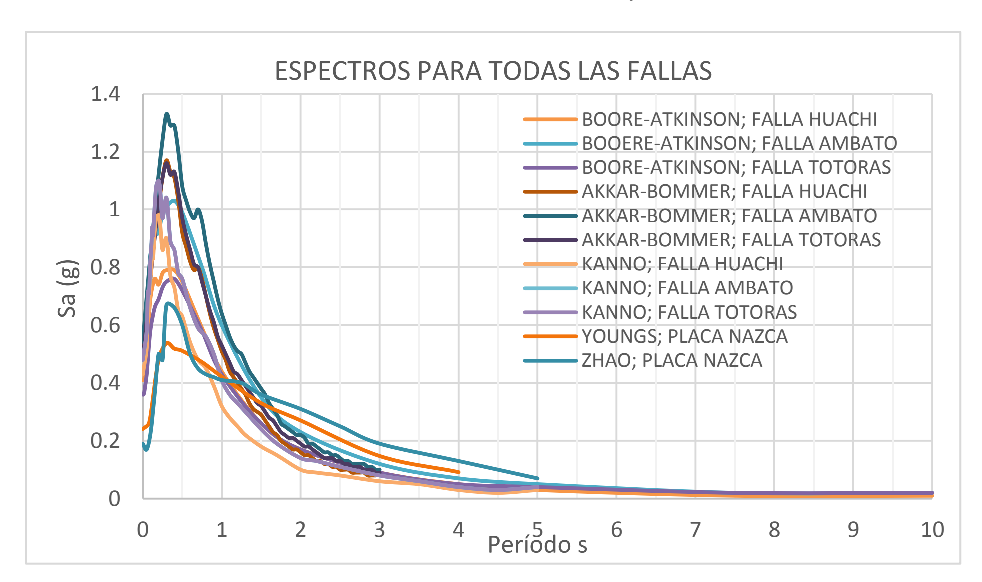


Figura 9 Espectros generados para todas las fallas
Fuente. – Elaboración Propia

De lo anterior se desprende que no existe un sismo controlador, es decir cuyas aceleraciones sean predominantes para todos los períodos. Por esta razón,

varios autores e incluso códigos de construcción como (AASHTO LRFD , 2014) recomiendan que, en este caso, el espectro específico sea determinado por la envolvente de espectros de todas las fuentes consideradas. Por lo tanto, en la figura 9 se muestra la envolvente de espectros, es decir el espectro específico para el campus Huachi de la Universidad Técnica de Ambato. Adicionalmente, en el gráfico en mención se muestra la media aritmética de los espectros determinados.

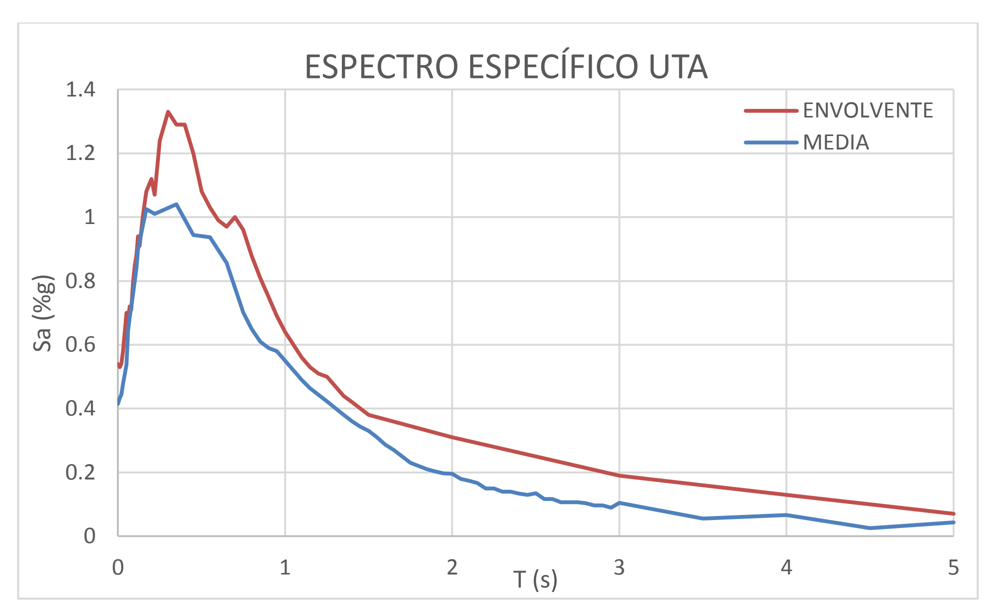


Figura 10 Espectros Específico UTA
Fuente. – Elaboración Propia

La base de datos del espectro envolvente y de la media se muestran en la tabla 5 y 6 respectivamente.

Tabla 5 Espectro Específico Campus Huachi UTA (Envolvente)

T (seg)	Sa (g)	T (seg)	Sa (g)	T (seg)	Sa (g)	T (seg)	Sa (g)
0	0,54	0,13	0,91	0,6	0,99	1,2	0,51
0,01	0,53	0,15	1,01	0,65	0,97	1,25	0,5
0,02	0,54	0,17	1,08	0,7	1	1,3	0,47
0,03	0,58	0,2	1,12	0,75	0,96	1,35	0,44
0,05	0,7	0,22	1,07	0,8	0,88	1,4	0,42
0,06	0,68	0,25	1,24	0,85	0,81	1,45	0,4
0,07	0,72	0,3	1,33	0,9	0,75	1,5	0,38
0,08	0,71	0,35	1,29	0,95	0,69	2	0,31
0,09	0,79	0,4	1,29	1	0,64	2,5	0,25
0,1	0,85	0,45	1,2	1,05	0,6	3	0,19
0,11	0,88	0,5	1,08	1,1	0,56	4	0,13
0,12	0,94	0,55	1,03	1,15	0,53	5	0,07

Tabla 6 Espectro Específico Campus Huachi UTA (Media)

T (seg)	Sa (g)	T (seg)	Sa (g)	T (seg)	Sa (g)	T (seg)	Sa (g)
0.00	0.41	0.35	1.04	1.35	0.38	1.95	0.20
0.01	0.43	0.45	0.94	1.40	0.36	2.00	0.20
0.02	0.44	0.55	0.94	1.45	0.34	2.05	0.18
0.03	0.48	0.65	0.86	1.50	0.33	2.10	0.17
0.05	0.54	0.75	0.70	1.55	0.31	2.15	0.17
0.06	0.65	0.80	0.65	1.60	0.29	2.20	0.15
0.07	0.69	0.85	0.61	1.65	0.27	2.30	0.14
0.09	0.76	0.90	0.59	1.70	0.25	2.40	0.13
0.11	0.84	0.95	0.58	1.75	0.23	2.50	0.14
0.12	0.90	1.10	0.49	1.80	0.22	3.00	0.10
0.17	1.03	1.15	0.46	1.85	0.21	4.00	0.07
0.22	1.01	1.25	0.42	1.90	0.20	5.00	0.04

3.6 Espectro Específico vs Espectro Elástico NEC-SE-DS

Adicionalmente, se ha calculado el espectro elástico de acuerdo a (NEC-SE-DS, 2015) para el sismo de diseño (Tr=475 años), para las estructuras del campus Huachi de la UTA, y así poder determinar si las aceleraciones calculadas del espectro de diseño cubren las aceleraciones del evento máximo obtenido del estudio de peligro sísmico. En la figura 10 se muestran los resultados obtenidos.

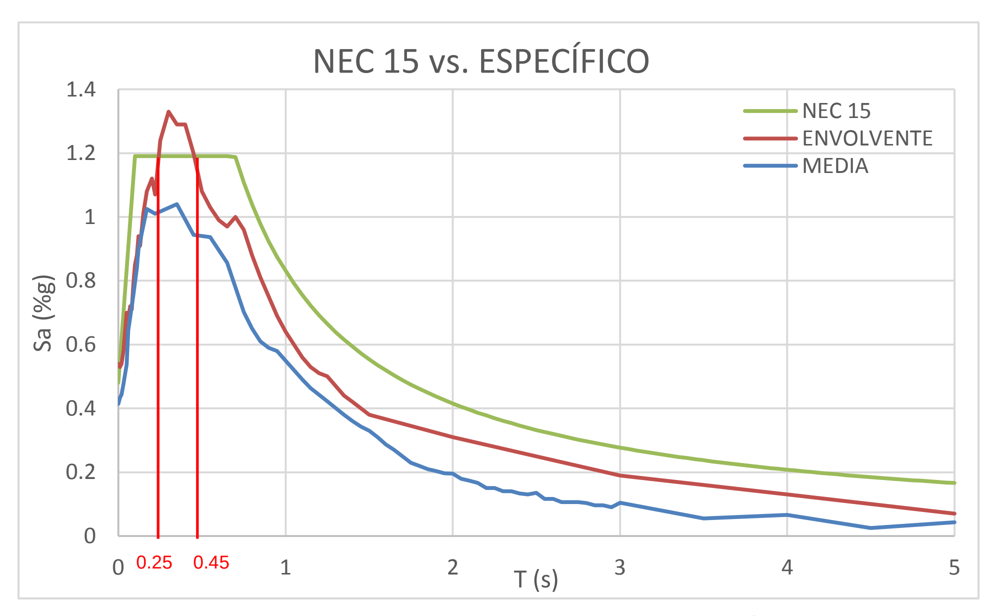


Figura 11 Espectro NEC15 vs Espectro Específico
Fuente. – Elaboración Propia

En primera instancia se puede observar que el PGA del suelo obtenido del estudio de peligro sísmico (0.54g) supera al PGA obtenido de la NEC15 (0.48g). En el caso de la media, el valor del PGA alcanzado es de 0.41g, ligeramente menor al dado por la normativa. Adicionalmente, se puede apreciar que las aceleraciones provenientes del espectro medio son menores para todos los períodos estructurales en comparación con el espectro NEC 15.

Por otro lado, existe un rango de períodos estructurales crítico entre 0.25s y 0.45s, en el que las aceleraciones del evento máximo superan a las aceleraciones de diseño obtenidas con la normativa, por lo que se colige que existe mayor probabilidad de colapso en las estructuras situadas en el campus cuyos períodos se encuentren en ese rango.

4. CONCLUSIONES

Del estudio de peligro sísmico se desprende que, para el sitio de estudio, las fallas más cercanas (régimen cortical) son potencialmente más peligrosas para estructuras de período corto, mientras que las fallas más lejanas (régimen subducción) ocasionan mayores inconvenientes a estructuras de periodo largo.

Es imperativo que para cada régimen y fallamiento analizado se consideren al menos 3 ecuaciones de atenuación, de manera que se pueda observar el grado de ajuste y aplicabilidad al comparar los resultados obtenidos. En el caso de estudio, para distancias más cercanas se tiene un mejor ajuste con las ecuaciones de (Kanno & et al, 2006) y (Boore & Atkinson, 2008), mientras que con (Akkar & Bommer, 2010) los valores tienden a incrementar por lo que se alejan del promedio sobre todo para período corto. Sin embargo, conforme aumenta la distancia al sitio de estudio los valores obtenidos con (Boore & Atkinson, 2008) tienden a decrecer por lo que se alejan del promedio.

Se concluye que la falla potencialmente más peligrosa para las estructuras situadas en el campus Huachi de la UTA, es la falla Ambato que puede generar un sismo de magnitud de momento máximo de 6.5. Esto se justifica debido a que se encuentra a tan solo 500m de distancia de la misma, por lo que, en futuros diseños de infraestructura en el campus, se deberá considerar esta falla para análisis por desempeño de las estructuras, así como efectos de campo cercano.

El número de pisos de las estructuras del campus Huachi varía entre 1 y 5 pisos por lo que se estima que el rango de períodos de dichas estructuras esté entre 0.2s y 0.6s. Por otro lado, luego de haber realizado el estudio de peligro se concluye que existe un rango de períodos crítico en el que las aceleraciones obtenidas del espectro específico son mayores a las aceleraciones del sismo de diseño obtenido aplicando la normativa. Este rango se encuentra entre 0.25s y 0.45s por lo que se debe prestar mayor atención a estructuras dentro de este rango pues presentan mayor grado de riesgo sísmico.

Se espera que en el evento sísmico máximo se genere en el sitio de estudio una aceleración pico del suelo de 0.54g que comparándose con el espectro NEC, esta llega a 0.48g. El valor máximo de aceleración que se espera es de 1.33g para un período de vibración de 0.3s, mayor al valor de la meseta de aceleraciones de la NEC de 1.1904g.

REFERENCIAS

AASHTO LRFD . (2014). *Bridge Design Spacifications.* Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Aguilar, Z. (2016). *Análisis del Peligro Sísmico y Estimado del Movimiento Sísmico de Diseño.* Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.

Akkar, S., & Bommer, J. (2010). Empirical Equations for the Prediction of PGA, PG V, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East. *Seismological Research Letters Volume 81, Number 2*, 195-206.

Boore , D., & Atkinson, G. (2008). Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01s and 10.0s . *Earthquake Spectra, Volume 24, No. 1*, 99–138.

Cotton, F., & et al. (2006). Criteria for Selecting and Adjusting Ground-Motion Models for Specific Target Regions: Application to Central Europe and Rock Sites. *Journal of Seismology*.

Egred, F., & Yepes et al, H. (2007). *Breves fundamentos sobre terremotos en el Ecuador.* Quito: IG-EPN Corporación Editora Nacional.

Egüez , A., Alvarado, A., & Yepes, H. (2003). Database and Map of Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore regions. *USGS Open-File Report 03-289* .

Global Earthquake Model. (2009). *Global Eartquake Model*. Obtenido de www.globalearthquakemodel.org

IG-EPN. (2017). *Catálogo Sísmico Homogenizado 1587-2017.* Quito: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.

Joyner, W., & Boore, D. (1981). Peak horizontal acceleration and velocity from

strong-motion records including records from the 1979 imperial valley, California, earthquake . *Bulletin of the Seismological Society of America No. 71 Vol 6*, 2011-2038.

Kanno, T., & et al. (2006). A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data. *Bulletin of the Seismological Society of America Vol. 96, No. 3*, 879–897.

Kramer, S. (1996). *Geotechnical earthquake engineering.* Upper Sadle: Prentice Hall.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface. *QR of RTRI, Vol 30, No 1*.

NEC-SE-DS. (2015). *Norma Ecuatoriana de Construcción. Diseño Sismoresistente.* Quito: MIDUVI.

NeoTec. (2011). *Neotectonic Open Database*. Obtenido de www.neotec-opendata.com

Pérez-Santisteban, I., & Muñoz, M. (2012). Correlaciones empíricas entre la velocidad de propagación de las ondas S (Vs) y otros parámetros geotécnicos para los suelos de Madrid. *7a Conferencia Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, 641 - 648.

Wells, D., & Coppersmith, K. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America Vol. 84, No. 4*, 974-1002.

Youngs, R., & et al. (1997). Strong Groud Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. *Seismological Research Letters Volume 68, No. 1*, 58-73.

Zhao, J., & et al. (2006). Attenuation Relations of Strong Ground Motions in Japan Using Site Clasification base on Predominant Period. *Bulletin f Seismological Society of America Vol 96, No 3*, 898-913.